

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：13601

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560566

研究課題名(和文)ハイブリッド鋼桁の挙動と設計法

研究課題名(英文)Behaviour and Design of Hybrid Steel Girders

研究代表者

清水 茂 (SHIMIZU, Shigeru)

信州大学・工学部・教授

研究者番号：90126681

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円、(間接経費) 960,000円

研究成果の概要(和文)：普通鋼と高強度鋼の混合桁であるハイブリッド鋼桁について、その崩壊形式を数値計算により調べた。その結果、これまで、通常は発生しないとされていたフランジ垂直座屈が主要な崩壊形式であること、垂直座屈は他の崩壊形式に比べて強度が急激に低下する、極めて危険な形式であることがわかった。また、これまで用いられていた垂直座屈の照査式は必ずしも適切な結果を与えないこともわかった。

研究成果の概要(英文)：The collapse behaviour of the hybrid steel girders under bending is studied with the FEM analyses. The results of the analyses indicate that the flange vertical buckling is the major collapse pattern of the hybrid girders. It is also found that the Basler's formula is not appropriate to verify flange vertical buckling.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学、構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：鋼構造 ハイブリッド鋼桁 垂直座屈

1. 研究開始当初の背景

(1) ハイブリッド鋼桁とは、フランジのみに高強度鋼、腹板に普通鋼を用いた鋼桁のことである。一般に、鋼桁が曲げを受ける場合、その曲げのほとんどはフランジで受け持つ。このため、フランジのみに高強度鋼を用いたハイブリッド鋼桁は、曲げに対しては、すべてに高強度鋼を用いた場合とほぼ同等の強度を有しながら、コストの削減が可能となる。

(2) 研究代表者の清水が参加した、日本鋼構造協会によるハイブリッド鋼桁に関する委員会では、その活動の一環として、ハイブリッド鋼桁の挙動を知るための実験も行った。その実験では、供試体のうち一体で予期せぬ腹板せん断座屈が、別の一体では同じく予期せぬフランジ垂直座屈が発生した。

(3) 通常の桁の場合、せん断による崩壊ではフランジに塑性ヒンジが出来ることを前提としている。しかし、ハイブリッド鋼桁では、フランジに塑性ヒンジが形成されないことを前提とした設計法が必要である。これについては、清水のこれまでの研究により、ある程度の成果は得られていた。

(4) フランジ垂直座屈は、これまで、腹板がフランジに比べ極端に弱い場合に発生するとされており、通常は、ほとんど発生しないものとして、問題視されていなかった。ところが、ハイブリッド鋼桁は、まさに、上記の『腹板がフランジに比べ弱い場合』に該当する。一方、実験で垂直座屈が観察された供試体は、垂直座屈に関する、事実上唯一の照査式である Basler の式によると垂直座屈は発生する筈のない断面寸法を有していた。そこで、曲げを受けるハイブリッド鋼桁のフランジ垂直座屈についても詳しく調べる必要がある。

2. 研究の目的

(1) 本研究の当初の目的は、ハイブリッド鋼桁のせん断強度、フランジ垂直座屈強度を調べ、ハイブリッド鋼桁の設計法を考察することである。

(2) せん断強度については、これまでの研究である程度の知見が得られつつあるため、その成果をもとに、フランジに塑性ヒンジが形成されないことを前提とした設計法を考察することとしていた。

(3) フランジ垂直座屈は、それ自体、非常に珍しい現象とされていることから、まず、パラメーター解析によりそれが発生する条件を把握する。次いで、フランジ垂直座屈の座屈強度を求めるための、力学的モデルについて考察する。最終的には、垂直座屈強度を調べ、それを、ハイブリッド鋼桁の設計に反映させる方法について考察する。

ハイブリッド鋼桁は、その特性から曲げを受ける場合に効果を発揮する。そのため、曲げを受ける場合に発生する可能性のあるフランジ垂直座屈について調べることを、本研究の主たる目的とした。

3. 研究の方法

1) 研究は、有限要素法による数値解析によって行った。解析の対象とするモデルは、前述の、日本鋼構造協会が実施したハイブリッド鋼桁に関する実験で、フランジ垂直座屈が発生した試験体をもとに設定した。図 - 1 は、その実験用模型の概形である。

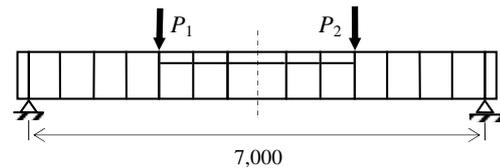


図 - 1 実験模型の概要

図のように実験用模型は支間長 7 m の桁であり、桁高は 900 mm、幅 200 mm のフランジを有する I 型断面をしている。また、桁中央から左右に 1500 mm ずつ離れた位置に 2 つの集中荷重が載る 2 点載荷としている。模型の板厚は、フランジが 15 mm、腹板が 4.5 mm である。

桁には 50 mm 間隔で垂直補剛材を配置し、さらに中央部分には水平補剛材も設置した。用いた材料は、フランジについては SM570 高強度鋼、桁中央部分の腹板には LY235 降伏点鋼、それ以外の腹板には SM400 普通鋼である。

(2) 解析用モデルの寸法は、上記(1)で説明した実験用模型をもとに、フランジ厚を 10 mm から 20 mm、腹板厚を 3.2 mm から 6.3 mm、桁高を 600 mm から 1200 mm の間で変化させ、それぞれの組み合わせに対し、垂直座屈発生の有無を調べた。

表 - 1 解析に用いた材料特性

Grade	E (GPa)	σ_y (MPa)	ν
SM570	199	596	0.29
SM400	188	433	0.28
LY235	199	265	0.29

前述の実験の後、実験用模型から切り出した材料試験片に対して材料試験(引張試験)を行い、材料特性を調べている。そこで、解析でも、材料特性は、各鋼種の公称値ではなく、その材料試験により得られた値を用いた。解析で用いた材料特性のうち、ヤング係数 E、降伏応力 σ_y 、ポアソン比 ν は、表 - 1 に示すとおりである。

(3) 荷重は、当初は、図 - 1 中の 2 つの荷重 P_1 、 P_2 を等しく $P_1 = P_2$ としていた。これは、実験で、2 つの等しい荷重による 2 点載荷で純曲げの状態を求めたからである。しかし、後の「4. 研究成果」で説明するように、

この場合は、図 - 2 に示すように、どのパラメータでもフランジ垂直座屈は発生せず、得られる座屈形式はフランジねじれ座屈のみ出てあり、実験結果を再現することが出来なかった。そこで、残されていた実験結果を精査したところ、2つの荷重の大きさにわずかな差があり、図の左側の荷重 P_1 が、右側の荷重 P_2 より1%程度大きかったことがわかった。そこで、いくつかのモデルについて P_1 を P_2 より1%大きな状態で解析したところ、ほぼ実験と同じフランジ垂直座屈変形が確認できた。そこで、この研究では、2つの荷重 P_1 、 P_2 について、 P_1 を P_2 より1%大きく保った状態で解析することとした。

なお、この事実は、フランジ垂直座屈の発生が、わずかな非対称性に依存していることを示しており、後述の研究成果の一つとなっている。

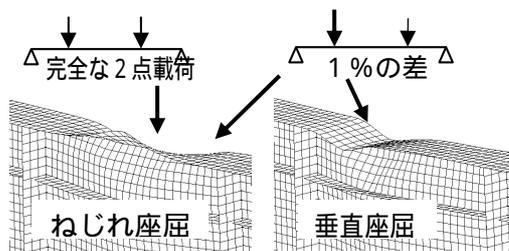


図 - 2 荷重と座屈形式

(4) 解析用モデルは、4節点シェル要素で離散化した。ただし、大きさの異なる要素が接続する部分や補剛材取り付け部などでは、3角形シェル要素を用いている。解析は弧長増分法による大変形弾塑性解析である。解析は、この研究費でライセンスを購入した、有限要素法プログラムパッケージ MSC-Marc によった。

4. 研究成果

(1) 座屈形式と荷重 - 変形曲線

図 - 3 ~ 図 - 5 に、本研究で得られた最も典型的な座屈形式を示す。これらの図に示した解析モデルはいずれも実験用模型と同じく、腹板幅 b 、腹板厚 t_f がそれぞれ $b = 900\text{mm}$ 、 $t_f = 4.5\text{mm}$ を有するモデルであるが、フランジ厚さ t_f のみ、 $t_f = 15\text{mm}$ 、 $t_f = 14\text{mm}$ 、 $t_f = 12\text{mm}$ としている。

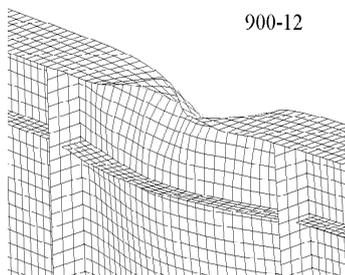


図 - 3 フランジねじれ座屈 $t_f = 12\text{mm}$

これらの図のうち、腹板厚が $t_f = 12\text{mm}$ の

図 - 3 では、フランジが大きくねじれる、いわゆるフランジねじれ座屈を示している。この座屈形式は、図 - 2 左側に示すような、左右の荷重の大きさが等しい完全な2点載荷の場合についても得られている。

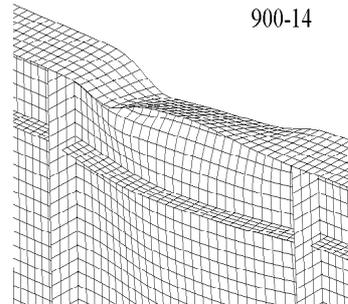


図 - 4 連成座屈 $t_f = 14\text{mm}$

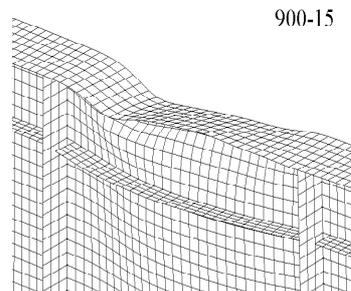


図 - 5 フランジ垂直座屈 $t_f = 15\text{mm}$



図 - 6 鋼構造協会による実験

(清水他、鋼構造論文集 2003)

一方、図 - 5 に示す $t_f = 15\text{mm}$ の場合は、実験で観察された垂直座屈変形(図 - 6)とほぼ同じく、フランジが垂直に腹板内に食い込む変形を呈しており、フランジ垂直座屈が発生していることが確認できる。この垂直座屈は、桁中央よりやや左に寄った位置である。実験でも垂直座屈の発生位置は桁中央よりわずかに左に寄った箇所であったため、この図 - 5 では、実験結果をほぼ忠実に再現できたと考えられる。

腹板厚がそれらの中間である $t_f = 14\text{mm}$ のモデルでは、フランジに、ねじれと垂直座屈双方の変形が見られる。すなわち、この解析モデルの場合、フランジねじれ座屈とフランジ垂直座屈の中間的な挙動を示している。

図 - 7 には、これらの解析モデルの荷重 - 変形曲線を示す。うち、荷重は左右に載荷さ

れている2つの荷重のうち、左側すなわち P_1 の値であり、変形は桁中央部における上フランジの鉛直方向の変位である。図中の凡例で、900-15等の記号のうち、左3桁の900が腹板幅、右2桁の12、14、15がフランジ厚（いずれもmm）である。

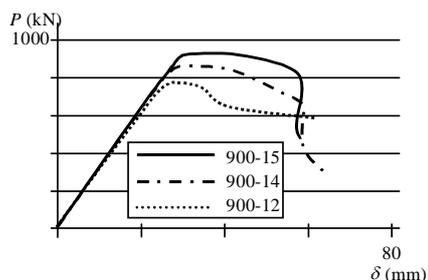


図 - 7 荷重 - 変形曲線

図 - 7には、これらの解析モデルの荷重 - 変形曲線を示す。うち、荷重は左右に載荷されている2つの荷重のうち、左側すなわち P_1 の値であり、変形は桁中央部における上フランジの鉛直方向の変位である。図中の凡例で、900-15等の記号のうち、左3桁の900が腹板幅、右2桁の12、14、15がフランジ厚（いずれもmm）である。

これら3本の荷重 - 変形曲線は、いずれもその最大荷重付近まではほぼ線形に増加している。最大荷重の大きさは、フランジ厚 $t_f=12\text{mm}$ のモデルで 758kN 、 $t_f=14\text{mm}$ で 866kN 、 $t_f=16\text{mm}$ で 974kN であり、フランジ断面が大きいほど最大荷重も大きいという、当然の結果となっている。

一方、最大荷重後に注目すると、これら3つのモデルは、座屈形式ごと、すなわち腹板厚ごとに、異なる挙動を示した。

まず、座屈形式がフランジねじれ座屈となった $t_f=12\text{mm}$ のモデルの場合、最大荷重に達した後は、荷重が緩やかに低下し、腹板が、次第にねじれ変形が現れ、そのまま最終段階に達している。

これとは対照的に、フランジ厚 $t_f=16\text{mm}$ のモデルでは、最大荷重の後も、しばらくの間は、変形はほぼそのままの状態を保っていた。その後、荷重が極めて急速に低下し、ほぼ同時に垂直座屈変形が急速に発達した。前述の、清水が携わった日本鋼構造協会によるハイブリッド鋼桁に関する実験でも、垂直座屈が発生した模型の場合、実験中、ほとんど前兆もないまま、大きな音響とともに、突然、垂直座屈変形が発生し、同時に荷重がきわめて急激に減少した様子が観察されている。すなわち、フランジ垂直座屈は、発生後、その変形が極めて短時間で進展し、しかも荷重も急激に低下する、という点において、フランジねじれ座屈とは異なり、危険な座屈形式であると言える。

両者の中間であるフランジ厚 $t_f=14\text{mm}$ のモデルの場合は、一旦、フランジねじれ座屈的な変形が生じ、荷重が緩やかに減少し始め

た後に、フランジ垂直座屈に移行した。

同様の傾向は、この研究課題の中で扱ったすべての桁高の解析モデルについても見られた。

(2) フランジ・腹板の板厚

垂直座屈は、腹板が薄い場合すなわち腹板が弱い場合に発生するとされている。そこで、垂直座屈が発生する限界の腹板厚を知るため、垂直座屈の発生の有無と腹板厚・フランジ厚の関係を調べた。その結果の一部を表 - 2 に示す。この表の横方向はフランジ厚 t_f 、縦方向は腹板厚 t_w であり、表中の値はフランジ厚 t_f の腹板厚 t_w に対する比 t_f/t_w である。この比の値が斜字で示している腹板厚 t_w ・フランジ厚 t_f のモデルで垂直座屈座屈が確認された。他のモデルにおける座屈形式は、フランジねじれ座屈である。

この表によると、腹板厚さの小さいモデルで、また、腹板厚さが大きい場合は相対的に大きな腹板厚さのモデルでも、垂直座屈が発生していることが確認できる。垂直座屈とフランジねじれ座屈の境界におけるフランジ厚 t_f の腹板厚 t_w に対する比 t_f/t_w はいずれも 2.80 前後である。この事実は、今後、フランジ垂直座屈の発生の有無を照査する際の、その方法に示唆を与えていると考えられる。

(3) 桁高の影響

Basler は、I 型鋼桁のフランジ垂直座屈について、その発生の有無を、腹板の幅厚比を用いて照査する式を提案している。しかし、清水が携わった実験で垂直座屈が発生した試験体、前述の数値解析の結果、いずれにおいても、Basler の式で垂直座屈が発生しないはずのモデルで垂直座屈が確認された。

そこで、本研究では、Basler の式を検証するため、桁高をパラメータとした解析を行った。その結果をまとめたものが表 - 3 である。

表 - 2 腹板厚とフランジ厚

$t_w \setminus t_f$		t_f				
		13mm	14mm	15mm	16mm	18mm
t_w	4.0mm	3.25	3.50	3.75	4.00	4.50
	4.5mm	2.89	3.11	3.33	3.56	4.00
	5.0mm	2.60	2.80	3.00	3.20	3.60
	5.6mm	2.32	2.50	2.68	2.86	3.21
	6.0mm	2.17	2.33	2.50	2.67	3.00
	6.3mm	2.06	2.22	2.38	2.56	2.86
	7.0mm	1.86	2.00	2.14	2.29	2.57
	8.0mm	1.63	1.75	1.88	2.00	2.25

この表では、縦方向にフランジの板厚 t_f 、横方向に桁高 b をとり、表中の値はそれぞれのフランジ厚・桁高に対する最大荷重を示している。最大荷重の値の右にある T、C、V の記号はそのモデルの座屈形式であり、T がフランジねじれ座屈、C がねじれと垂直座屈の連成座屈、V が垂直座屈が発生したことを示している。腹板厚はいずれも 4.5 mm としている。

座屈形式は、この表に示すとおり、全体的に、フランジが薄い場合はフランジのねじれ座屈、フランジが厚い場合はフランジ垂直座屈となる。その境界は、このモデルの場合、フランジ厚さが 14 mm ~ 15 mm 程度の場合であり、腹板高さには、ほとんど依存していない。この事実は、垂直座屈を腹板の幅厚比で照査している Basler の式が、必ずしも適切ではないことを示唆している。

表 - 3 桁高と座屈形式

t_f	$b=600\text{mm}$	$b=750\text{mm}$	$b=900\text{mm}$	$b=1050\text{mm}$	$b=1200\text{mm}$
mm	kN	kN	kN	kN	kN
10	414 T	533 T	653 T	764 T	848 T
11	453 T	580 T	708 T	828 T	924 T
12	490 T	627 T	762 T	893 T	990 T
13	528 T	672 T	816 C	957 C	1067 T
14	564 T	718 T	870 C	1021 C	1138 C
15	601 C	763 C	924 V	1083 V	1213 V
16	637 V	810 V	978 V	1146 V	1290 V
17	674 V	854 V	1032 V	1209 V	1365 V
18	710 V	899 V	1086 V	1270 V	1439 V
19	746 V	945 V	1140 V	1332 V	1512 V
20	782 V	990 V	1194 V	1396 V	1585 V

(4) Basler の式の検証

以上の結果を受け、今後、フランジ垂直座屈の適切な照査法を検討する際の参考のため、本研究では、Basler の式が、なぜ不適切な結果をもたらすのか、簡単に考察した。

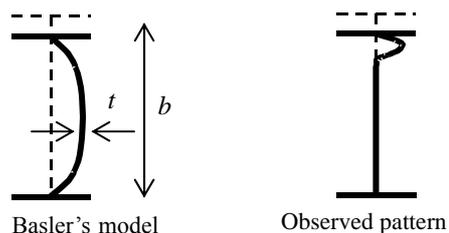


図 - 8 Basler のモデルと実際の変形

Basler は、フランジ垂直座屈を生じない限界の腹板幅厚比 t/b を求める式を提案している。その式の前提となる座屈変形を見ると、Basler は、腹板を、図 - 8 左側のように、上フランジからの圧縮を受ける板要素と考えている。極言すると、Basler は、フランジ垂直座屈を、一種の腹板の座屈と考えている。照査の対象は腹板の幅厚比 t/b であり、当然のことながら、腹板の幅すなわち桁高 b が垂直座屈の有無に影響している。

一方、清水が行った実験、及び本研究で得られた結果を見ると、垂直座屈が発生した際の腹板は、図 - 8 右のように、その上部のみが変形し、下側では面外変形はほとんど見られない。このことは、腹板の下部は、垂直座屈という現象にはほとんど寄与していないことを示唆している。前記(3)で、垂直座屈発生の有無が桁高に依存していないのとは、このことが要因と考えられる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計3件)

T. Ueda, Y. Matoge, S. Shimizu, G. Fujita & N. Tanaka: A Parametric Study on Flange Vertical Buckling of Hybrid Steel Girders, Proc. of the 10th Conference on Shell structures theory and applications, Gdansk, Poland, 2013.9.19

Y. Matoge, S. Shimizu, Y. Yamasaki, G. Fujita, N. Tanaka : Vertical buckling behaviour of hybrid steel girders, Proc. of XIII symposium on stability of structures, Zakopane, Poland, 2012.10.17

S. Shimizu, Y. Yamasaki, N. Tanaka : The Numerical Analysis on Flange Vertical Buckling in Hybrid Steel Girders, AIP Conf. Proc. 1389, International Conference on Numerical Analysis and Applied Mathematics (ICNAAM 2011), Halkidiki, Greece, 1168-1671, 2011.9.23

6. 研究組織

(1)研究代表者

清水 茂 (SHIMIZU, Shigeru)

信州大学・工学部・教授

研究者番号 : 90126681